

На правах рукописи



Карпов Вадим Николаевич

**СПОСОБ СЖАТИЯ СИГНАЛОВ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ
РАДИОСИСТЕМАХ С АНАЛОГО-ИНФОРМАЦИОННЫМ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ**

Специальность 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и
устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2026

Работа выполнена в Институте микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ»

Научный руководитель: **Лялин Константин Сергеевич,**
кандидат физико-математических наук, доцент,
заместитель главного конструктора Института
микроприборов и систем управления имени Л.Н.
Преснухина НИУ «МИЭТ», г. Москва.

Официальные оппоненты: **Николаев Алексей Владимирович,**
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой «Техническая электродинамика и
антенны» МТУСИ, г. Москва

Панасенко Петр Васильевич,
доктор технических наук, профессор, заместитель
генерального директора АО «НИИМЭ», г. Москва

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-
исследовательский институт «Субмикрон»,
г. Москва

Защита диссертации состоится «06» октября 2026 года в 16.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.281.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», по адресу: г. Владимир, пр. Строителей, д. 3/7, корпус 3 ВлГУ, ауд. 301

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке университета и на сайте ВлГУ <http://diss.vlsu.ru>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д.87, ВлГУ, РТиРС, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.281.01. Тел. (4922) 534238, E-mail: ags@vlsu.ru.

Автореферат разослан «10 » июня 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук доцент



С.А. Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современные АЦП ограничивают полосу сигналов, оцифровываемых приемниками многоканальных радиосистем, а рост частоты дискретизации ведет к увеличению объема памяти, вычислительной нагрузки, сложности и стоимости цифровой обработки аналоговых сигналов.

Одним из решений является сжатая дискретизация: снижение частоты аналого-цифрового преобразования за счет сжатия сигнала непосредственно на этапе сбора данных.

Если сигнальная среда разрежена, полезная информация может быть получена по меньшему числу дискретов, чем требует критерий Котельникова/Найквиста, при наличии разреженного или почти разреженного представления сигнала в некотором базисе. Для сжатия достаточно базового предположения о разреженности сигнала.

Устройства на основе сжатой дискретизации называются аналого-информационными преобразователями (АИП). В отличие от традиционных АЦП они формируют оцифрованную и сжатую версию входного сигнала, выполняя сжатие во время оцифровки, а не после нее; поэтому одновременно снижаются частота дискретизации, потребность в памяти и поток данных без потери полезной информации.

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена возможностью создавать многоканальные радиотехнические системы с меньшей себестоимостью и лучшей энергоэффективностью за счет существенного сокращения информационного потока и применения более простых АЦП в каналах. Таким образом, настоящая диссертационная работа посвящена **решению актуальной научной задачи**, заключающейся в разработке и исследовании способа сжатия сигналов в многоканальных радиосистемах на основе аналого-информационного преобразователя, обеспечивающего снижение частоты дискретизации и информационного потока при сохранении возможности точного восстановления исходных сигналов.

Объектом исследования является многоканальная радиосистема.

Предметом исследования является способ сжатия сигналов в многоканальных радиосистемах посредством использования аналого-информационного преобразователя.

Цель работы: разработка и исследование способа аналого-информационного преобразования в многоканальных радиосистемах

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **научные задачи**:

1. Анализ современных методов и способов сжатого считывания данных.
2. Разработка методики оценки степени разреженности сигналов для применения теории сжатой дискретизации.
3. Исследование и разработка способа сжатия сигналов в многоканальных радиосистемах с АИП.
4. Исследование взаимного влияния параметров реальных радиосистем и параметров работы способа обработки сигналов с АИП.
5. Экспериментальная апробация способа и оценка качества работы АИП.

Методы исследований. Для решения поставленных задач в работе используются методы математического моделирования, известные методы частотного и временного анализа сигналов. Проведены лабораторные и экспериментальные исследования.

Научная новизна работы:

1. Предложена новая методика сокращения информационного потока в приемных каналах многоканальных радиотехнических систем, за счет применения теории сжатой дискретизации.
2. Впервые разработан способ сжатия сигналов в многоканальных радиосистемах с аналого-информационным преобразователем, позволяющий оцифровывать входной сигнал с частотой дискретизации меньшей, чем этого требуют традиционные подходы, основанные на критерии Котельникова/Найквиста.
3. Предложены технические основы проектирования многоканальных радиосистем с аналого-информационным преобразователем на основе разработанного способа в части системного проектирования.
4. Разработан прототип аналого-информационного преобразователя для многоканальной радиосистемы на основе разработанного способа.

Достоверность основных положений и выводов, выносимых на защиту, подтверждается использованием общеизвестного математического аппарата, математическим моделированием и экспериментальной отработкой.

Практическая значимость исследования.

1. Проведенные исследования показали применимость разработанного способа сжатия сигналов с АИП в многоканальных радиосистемах, включая FMCW датчики, системы структурного

мониторинга и когнитивное радио. Способ снижает частоту дискретизации АЦП в 4 раза относительно классического критерия Котельникова/Найквиста, упрощает аналого-цифровой тракт, снижает требования к АЦП и энергопотребление.

2. Для рабочей полосы входного сигнала до 2 МГц традиционно требуется АЦП не менее 4 МГц и 10-12 бит. Предложенный способ снижает требования до 1 МГц и 8 бит, что позволяет применять более доступные и энергоэффективные компоненты. В 16-канальной FMCW ММО-системе суммарный поток данных сокращается с 4,46 Гбит/с до 1,115 Гбит/с, пропорционально снижая требования к памяти и вычислительным ресурсам.

3. Разработанный способ может быть использован в беспроводных сенсорных сетях интернета вещей для снижения энергопотребления и увеличения срока автономной работы устройств.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс Института микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина «МИЭТ» при проведении занятий по курсу «Цифровая обработка сигналов», а также использованы в ООО «Квантум-ЦТ» при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанная методика оценки степени разреженности сигналов для систем сжатой дискретизации, позволяет установить предельную разреженность, равную 2%, для архитектуры случайного демодулятора при четырехкратном снижении частоты дискретизации.

2. Разработанный способ сжатия сигналов в многоканальных радиосистемах на основе аналого-информационного преобразователя обеспечивает уменьшение информационного потока от АЦП к вычислительно не менее чем в 4 раза без потери точности восстановления исходных сигналов.

3. Проведенный комплексный анализ влияния дестабилизирующих факторов радиосистем, приближенных к реальным, уточнил предельную разреженность входных сигналов до 1,85%.

4. Натурные испытания разработанного способа на созданном прототипе АИП показали, что при четырехкратном снижении частоты дискретизации уровень паразитных гармоник в восстановленном спектре не превышает -20 дБ относительно полезного сигнала.

Апробация результатов работы. Результаты доложены на девяти научно-технических конференциях 2023-2025 гг.: IEEE USBEREIT

2023 и 2024; ПТиТТ-2023, ПТиТТ-2024 и ПТиТТ-2025; «Микроэлектроника и информатика - 2024»; научные конференции «ЭКБ и микроэлектронные модули» в рамках Российского форума «Микроэлектроника 2024» и «Микроэлектроника 2025»; XXXI Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC*2025).

Публикации. Основное содержание работы представлено в 11 научных публикациях, в том числе 2 статьи в научных журналах, входящих в Перечень ВАК, 2 публикации, в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных Scopus и Web of Science, и 1 патент на изобретение.

Личный вклад автора. Автором выполнен анализ методов сжатой дискретизации, обоснован выбор архитектуры случайного демодулятора, разработана методика оценки разреженности сигналов, предложен и теоретически обоснован способ сжатия сигналов в многоканальных радиосистемах с АИП. На основе моделирования и исследований влияния реальных факторов уточнены требования к параметрам тракта и предельная разреженность входных сигналов; предложен и экспериментально апробирован прототип АИП, подтвердивший работоспособность способа при четырехкратном снижении частоты дискретизации.

Соответствие специальности. Содержание диссертации соответствует пунктам 1, 10, 16 паспорта специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, состоящего из 112 источников, списка сокращений, приложений, изложена на 130 страницах машинописного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи, показаны научная новизна и практическая значимость, определены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализировано современное состояние теории сжатой дискретизации, позволяющей преодолеть ограничения критерия Котельникова/Найквиста за счет сжатия сигнала на этапе сбора данных. Рассмотрены основные принципы: разреженность и несогласованность. Сигнал $x(t)$ называется разреженным, если его информация описывается небольшим числом значимых компонент в базисе Ψ , что описывается выражением:

$$x = \Psi c$$

Примером такого сигнала является гармонический сигнал, имеющий плотное представление во временной области и разреженное в частотной (Рисунок 1). Несогласованность означает, что формы выборки, задаваемые матрицей Φ , имеют плотное представление в базисе Ψ . Случайный выбор Φ -матрицы, повышает несогласованность и сокращает необходимое число измерений.

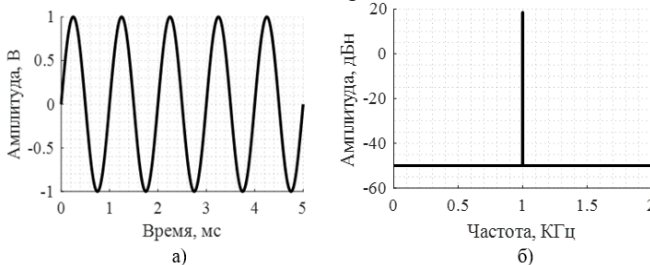


Рисунок 1– Представление гармонического сигнала: (а) во временной области, (б) в частотной области

Восстановление сжатых данных выполняется решением оптимизационной задачи с минимизацией l_1 -нормы в недоопределенной системе линейных уравнений:

$$y = \Phi x$$

Также сформулировано условие ограниченной изометрии (СОИ), гарантирующее возможность точного восстановления сигнала.

Проведен анализ методов сбора данных в теории сжатой дискретизации: случайного демодулятора (СД), модулированного

широкополосного преобразователя, предварительного интегратора со случайной модуляцией, случайной фильтрации, случайной свертки и компрессионного мультиплексора. Сравнение структур, принципов работы и областей применения показало, что СД (Рисунок 2) наиболее эффективен для частотно-разреженных сигналов благодаря простой аппаратной реализации, универсальности и адаптивности.

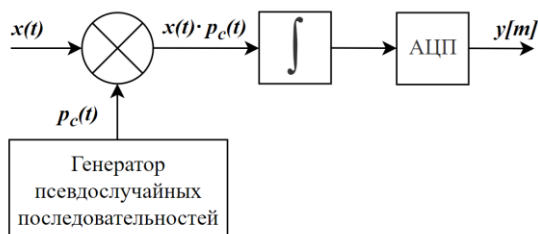


Рисунок 2 – Структурная схема СД

Разработана методика оценки степени разреженности частотно-разреженных сигналов для применения сжатой дискретизации. Она включает подготовку измерительной системы, формирование матрицы считывания Φ и итеративное определение предельной разреженности с использованием алгоритма ортогонального поиска соответствий (ОПС). Качество восстановления оценивается по наличию всех частотных составляющих, отклонению амплитуд не более 3 дБ и уровню паразитных гармоник не менее чем на 3 дБ ниже минимальной полезной амплитуды.

Показано, что случайный демодулятор позволяет выполнять субдискретизацию без точного знания расположения спектральных составляющих: псевдослучайное спектральное перемешивание устраняет ограничение классической полосовой выборки, связанное с наложением спектров.

Сделан вывод о перспективности сжатой дискретизации для снижения частоты дискретизации и требований к вычислительным ресурсам, обоснован выбор случайного демодулятора и представлена методика экспериментального определения предельной разреженности для конкретной архитектуры.

Во второй главе разработан способ сжатия сигналов в многоканальных радиосистемах с аналого-информационным преобразователем, который принципиально разделяется на два

самостоятельных этапа: аналого-цифровое сжатие сигналов на базе АИП со случайным демодулятором и цифровое восстановление методом ортогонального поиска соответствий. Структурная схема работы АИП представлена на рисунке 3.

На этапе аналого-цифрового преобразования входной частотно-разреженный сигнал $x(t)$ умножается на псевдослучайную последовательность $\{-1, +1\}$, генерируемую с частотой не ниже максимальной частоты входного сигнала. В качестве ПСП выбрана М-последовательность длиной 1024 с хорошими автокорреляционными свойствами и соответствием СОИ. Она генерируется линейными регистрами сдвига с обратной связью, а в ММО-системах циклические сдвиги одной М-последовательности позволяют получить ортогональные наборы с малой взаимной корреляцией. После умножения сигнал фильтруется ФНЧ и дискретизируется низкочастотным АЦП на частоте существенно ниже максимальной частоты входного сигнала; полученный вектор y содержит линейные измерения исходного сигнала.

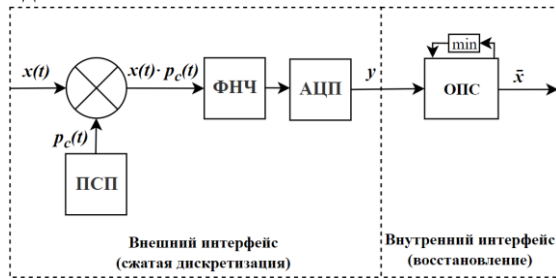


Рисунок 3 – Структурная схема работы АИП

На стороне внутреннего интерфейса восстановление сжатых данных выполняется методом ортогонального поиска соответствий, сочетающим вычислительную эффективность и приемлемое качество восстановления. Метод последовательно строит приближение сигнала, отбирая наиболее информативные компоненты из словаря измерений. Восстановленный сигнал описывается выражением:

$$\tilde{x} = \Phi \cdot c$$

Алгоритм итеративно строит приближение сигнала: на каждой итерации вычисляется корреляция остатка со столбцами матрицы Φ , выбирается столбец с максимальной корреляцией, обновляется опорное множество, оцениваются коэффициенты методом наименьших

квадратов и вычисляется новый остаток. Процесс продолжается до достижения порога остановки ε . Новизна способа подтверждена патентом на изобретение, а его блок-схема приведена на рисунке 4.

Применение разработанного способа в многоканальных системах позволяет снизить требования к объему данных.

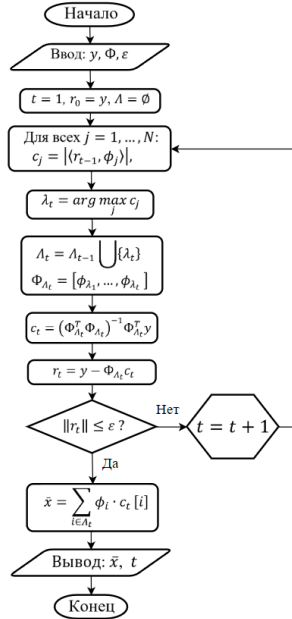


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма цифровой обработки и восстановления сигнала

Для верификации функционирования разработанного способа сжатия сигналов с АИП была составлена математическая модель. В качестве входного сигнала $x(t)$ был взят частотно разреженный сигнал с несколькими спектральными составляющими в диапазоне до 2 МГц, формируемый из суммы гармоник:

$$x(t) = \sum_{i=1}^{N_f} \cos(2\pi f_i t), \quad f_i \in [0, B]$$

В качестве ПСП выбрана М-последовательность длиной 1024 с частотой 4 МГц. После перемножения сигнал фильтровался ФНЧ на базе КИХ-фильтра 25 порядка и дискретизировался АЦП с частотой 1

МГц, что в четыре раза меньше удвоенной максимальной частоты входного сигнала. Результаты моделирования для двух и пяти частотных откликов представлены на рисунке 5, где продемонстрировано успешное восстановление всех частотных компонент исходного сигнала.

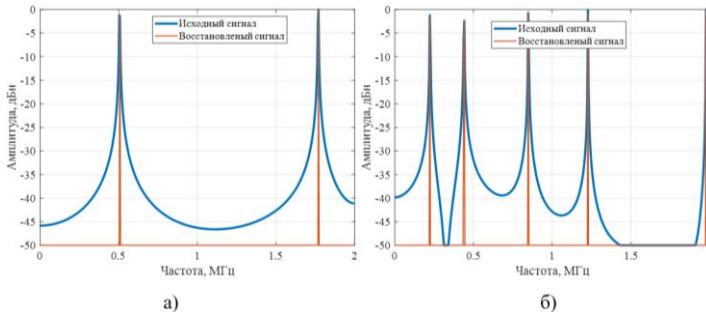


Рисунок 5 – Результат моделирования алгоритма: (а) для двух радиолокационных откликов, (б) для пяти радиолокационных откликов

С применением разработанной методики проведена оценка степени разреженности. Сигнал считался восстановленным при соблюдении трех критериев: наличие всех частотных составляющих, отклонение амплитуд не более 3 дБ, уровень паразитных гармоник не менее чем на 3 дБ ниже минимальной полезной амплитуды.

Для оценки степени разреженности при фиксированных параметрах количество спектральных составляющих K увеличивалось от 1 до 40 с усреднением по 30 испытаниям. Зависимость восстанавливаемости от K для $N = 1024$ представлена на рисунке 6.

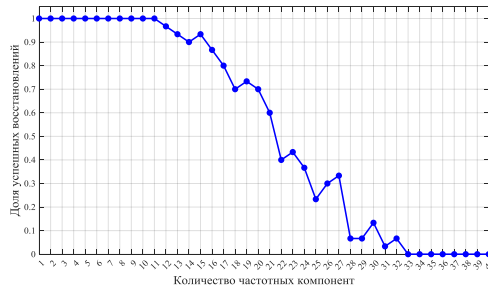


Рисунок 6 – Зависимость восстанавливаемости сигнала от количества спектральных составляющих для длины сигнала $N = 1024$

На основе моделирования составлена Таблица 1 зависимости разреженности числа собранных данных M для $N = 1024$.

Таблица 1. Зависимость разреженности сигнала от числа собранных данных M

Уменьшение частоты дискретизации	Число собранных данных M	Количество частотных компонент	Уровень разреженности
в 2 раза	512	23	2,2%
в 4 раза	256	20	2%
в 8 раз	128	8	0,8%
в 16 раз	64	2	0,2%
в 32 раза	32	0	-

По представленным данным видно, что уменьшение частоты дискретизации в 4 раза относительно удвоенной максимальной частоты входного сигнала является оптимальным вариантом с точки зрения уровня разреженности сигнала и количества частотных компонент в спектре. Эти данные позволяют также оценить применимость разработанного подхода для задач интернета вещей, открывая возможность создания сверхэкономичных сенсорных узлов.

Практическая значимость способа подтверждена примерами. В FMCW ММО-радиолокаторе Ку-диапазона отраженные после БПФ сигналы разрежены на частотах до 2 МГц; АИП снижает требуемую частоту дискретизации с 4 до 1 МГц. В 16-канальной ММО-системе с традиционными АЦП 14 бит и 20 Мвыб/с поток составляет 4,46 Гбит/с, а при АИП с 5 Мвыб/с - 1,115 Гбит/с, то есть снижается более чем в 4 раза. В системах структурного мониторинга IoT с пьезодатчиками частота дискретизации уменьшается со 100 до 25 кВыб/с, а для сети из 100 датчиков общий объем данных сокращается с нескольких Гбит/с до сотен Мбит/с. Для распределенного спектрального мониторинга в когнитивных радиосетях IoT достигается четырехкратное сокращение потока данных.

По итогам главы показано, что способ восстанавливает сигналы при частоте дискретизации в 4 раза ниже требований критерия Котельникова/Найквиста, снижает вычислительную нагрузку и поток данных; моделирование подтвердило работоспособность, а методика оценки разреженности определяет предельные параметры конкретной конфигурации. Для учета реальных условий необходима экспериментальная проверка.

В третьей главе проведено исследование влияния параметров реальных радиосистем на работу способа сжатия сигналов с аналого-информационным преобразователем, поскольку теоретическая эффективность, доказанная в идеальных условиях моделирования, требует корректировки при переходе к практической реализации.

Для анализа влияния шумовых характеристик в математическую модель добавлялся аддитивный белый гауссовский шум с заданным отношением сигнал/шум.

Моделирование для 20 спектральных компонент (пороговое значение, полученное в Главе 2) показало (Рисунок 7), что при ОСШ менее 8 дБ система неработоспособна, в переходной области 8–12 дБ вероятность восстановления растет, а значение ОСШ = 12 дБ является минимальным требованием для достижения вероятности восстановления выше 70%.

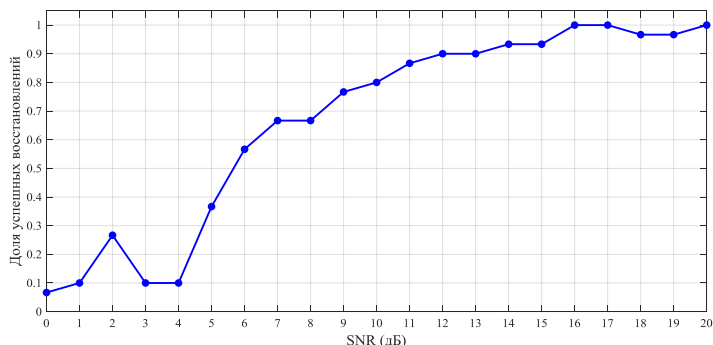


Рисунок 7 – Зависимость восстанавливаемости сигнала от ОСШ для 20 спектральных составляющих

При анализе влияния нелинейных искажений учитывалась кубическая нелинейность, параметризованная выходной точкой пересечения третьего порядка ОИРЗ. Связь коэффициентов с ОИРЗ задавалась через точку пересечения, отнесенную ко входу ИРЗ.

Моделирование (Рисунок 8) показало пороговый характер: при ОИРЗ менее 17 дБмВт восстановление практически отсутствует, в диапазоне 17–19 дБмВт вероятность резко растет, а при ОИРЗ ≥ 19 дБмВт нелинейные искажения перестают быть лимитирующим фактором.

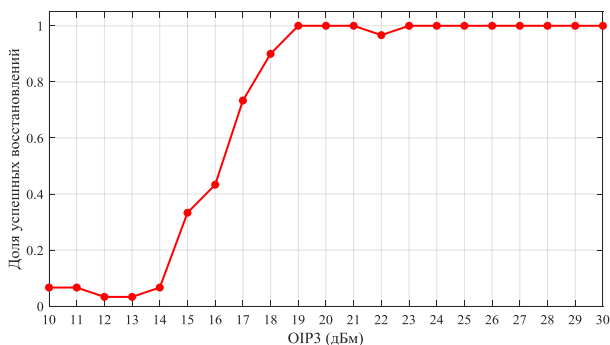


Рисунок 8 – Зависимость восстанавливаемости сигнала от OIP3 для 20 спектральных составляющих

Исследование влияния разрядности АЦП проводилось путем моделирования равномерного квантования.

Моделирование для разрядности от 4 до 10 бит показало, что при разрядности менее 6 бит ошибка квантования делает способ неэффективным, а стабильная работа достигается при использовании АЦП с разрядностью не менее 8 бит (Рисунок 9).

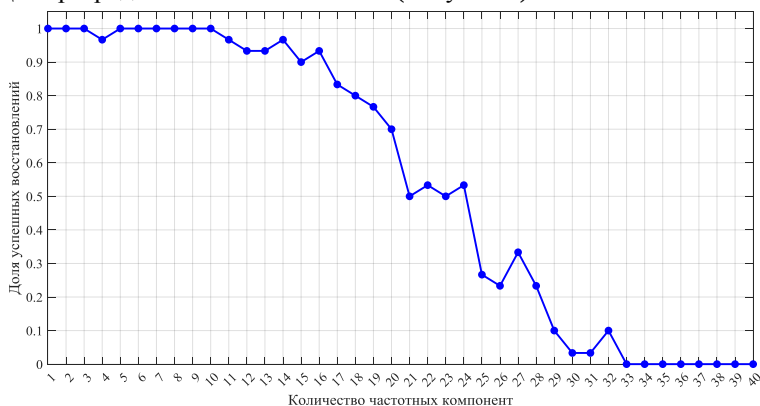


Рисунок 9 – Зависимость восстанавливаемости сигнала от количества спектральных составляющих для разрядности АЦП 8 бит.

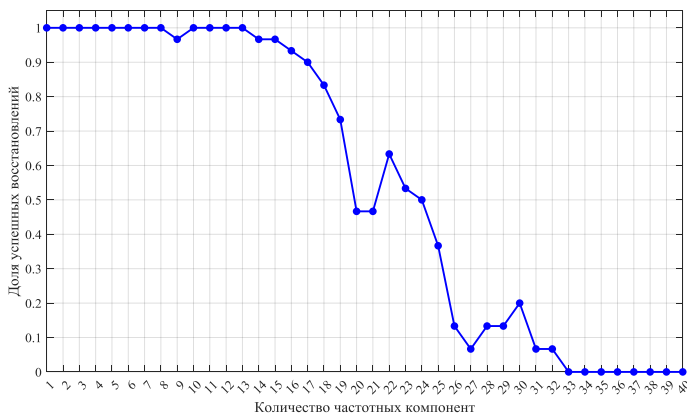


Рисунок 10 – Зависимость восстанавливаемости сигнала от количества спектральных составляющих для модели радиосистемы, приближенной к реальной

Комплексное моделирование с учетом совокупности всех факторов ($SNR = 12$ дБ, $OIP3 = 19$ дБмВт, $B = 8$ бит) для сигналов с числом спектральных компонент от 1 до 40, по 30 испытаний для каждого значения, показало (Рисунок 10), что для радиосистемы, приближенной к реальным условиям, способ сжатия сигналов с АИП обеспечивает успешное восстановление для 19 спектральных компонент, что уточняет ограничение на разреженность входного сигнала до уровня 1,85%.

На основе полученных результатов разработана методика системного проектирования радиосистем с применением способа сжатия сигналов с АИП. Методика включает три основных этапа.

Первый этап – определение требований к аналоговому тракту: обеспечение ОСШ не менее 12 дБ и $OIP3$ не ниже 19 дБмВт.

Второй этап – выбор АЦП с разрядностью не менее 8 бит и параметризация цифровой части, при этом мощность ошибки квантования должна быть на 12 дБ ниже мощности полезного сигнала.

Третий этап – комплексная проверка совокупного влияния факторов, где на этапе верификации необходимо убедиться, что для спроектированного тракта обеспечивается требуемая вероятность восстановления при заданной разреженности не более 1,85%.

Для многоканальных систем методика дополняется процедурами выбора архитектуры: при независимых каналах с отдельными АИП

восстановление может производиться параллельно стандартным ОМР; при аналоговом суммировании каналов с общим АЦП требуется формирование ортогональных М-последовательностей, например, циклическими сдвигами, и применение многоканальных алгоритмов восстановления типа Simultaneous Orthogonal Matching Pursuit (SOMP).

По итогам главы установлено, что параметры реальных радиосистем существенно влияют на эффективность алгоритмов; определены пороги $SNR \geq 12$ дБ, $OIP3 \geq 19$ дБмВт и разрядность ≥ 8 бит, уточнена предельная разреженность 1,85%, разработана методика системного проектирования и определены особенности многоканальных конфигураций.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальной апробации разработанного способа сжатия сигналов и оценка качества работы аналого-информационного преобразователя.

Для натурных испытаний реализован прототип АИП на базе случайного демодулятора. После сравнения архитектур выбран пассивный двойной балансный смеситель, обеспечивающий линейность, подавление паразитных составляющих и развязку портов; его параметры подтверждены моделированием в Multisim и измерениями макетной платы. М-последовательность длиной 1024 с частотой 4 МГц подавалась с лабораторного генератора сигналов. Перед дискретизацией применен LC-ФНЧ 7-го порядка с полосой среза 500 кГц. Функции низкочастотного АЦП 1 МГц и интерфейса восстановления выполняли осциллограф R&S RTO2044 и MATLAB. Итоговая схема прототипа АИП представлена на рисунке 11, а исследовательский стенд – на рисунке 12

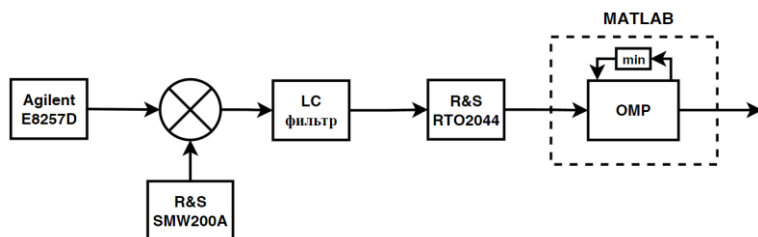


Рисунок 11 – Схема экспериментальной установки

На первом этапе экспериментальной проверки использовался входной сигнал с двумя частотными откликами на частотах 150 кГц и 1 МГц. Записанный с осциллографа сигнал был обработан в MATLAB.

Спектр восстановленного сигнала показал успешное восстановление
обоих откликов с незначительным уровнем паразитных составляющих.

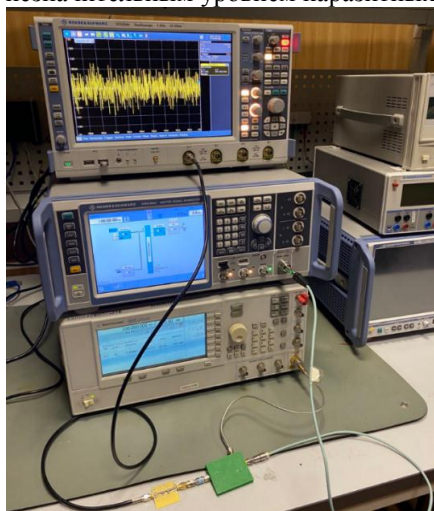


Рисунок 12 – Исследовательский стенд

Сравнение исходного и восстановленного сигналов (Рисунок 13)
подтвердило соответствие результатам математического
моделирования.

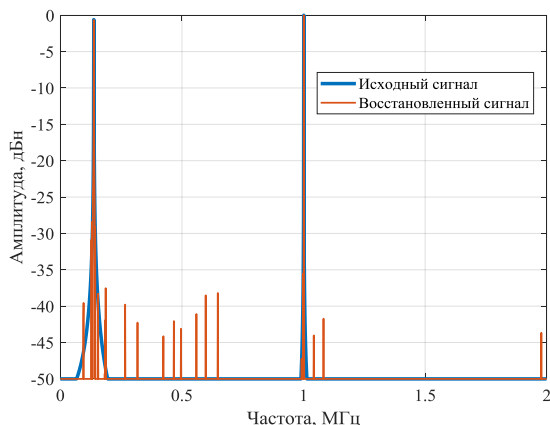


Рисунок 13 – Сравнение исходного и восстановленного сигнала с
двумя частотными откликами

Эксперимент с сигналом, содержащим пять частотных компонент также подтвердил работоспособность прототипа АИП. Далее был проведен эксперимент для максимального рассчитанного числа частотных компонент – 19 (Рисунок 14). Все частотные компоненты успешно восстановились, уровень паразитных составляющих оставался незначительным.

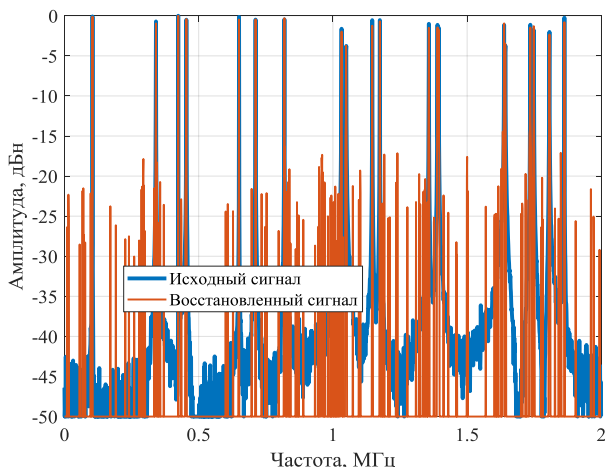


Рисунок 14 – Сравнение исходного и восстановленного сигнала с 19 частотными откликами при ОСШ = 20 дБ

Для проверки устойчивости к шумам в входной сигнал добавлялся аддитивный белый гауссовский шум с различным уровнем ОСШ. Экспериментальные результаты восстановления при ОСШ = 20, 15, 12, 10 и 5 дБ подтвердили, что при уменьшении ОСШ менее 12 дБ не все частотные компоненты восстанавливаются корректно, что согласуется с теоретическими расчетами.

Для сравнения экспериментальных результатов с данными моделирования был построен график зависимости восстанавливаемости сигнала от количества спектральных составляющих при ОСШ = 12 дБ (Рисунок 15). Полученная зависимость подтвердила соответствие экспериментальных данных результатам математического моделирования.

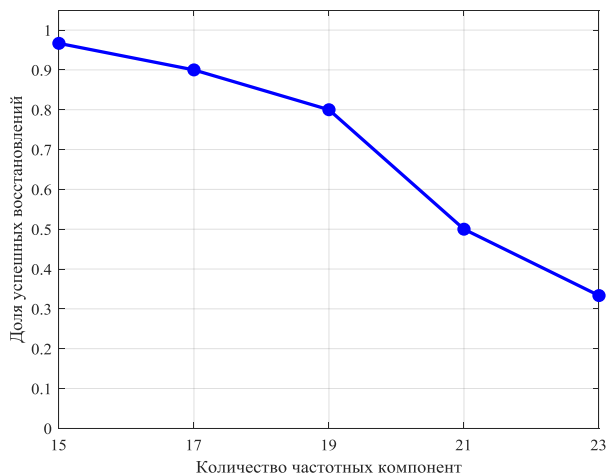


Рисунок 15 – Зависимость восстанавливаемости сигнала от количества спектральных составляющих для экспериментальных данных

По итогам четвертой главы реализован аппаратный прототип АИП на базе случайного демодулятора; экспериментально подтверждена работоспособность способа при частоте дискретизации в 4 раза ниже частоты Найквиста; выявлены незначительные паразитные компоненты, связанные с неидеальностью элементов; предложенные методика апробации и схемные решения создают основу для полнофункциональных устройств сжатой дискретизации.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Разработана методика оценки степени разреженности сигналов для систем сжатой дискретизации, позволяющая определять предельную разреженность входных сигналов на уровне 2% для архитектуры случайного демодулятора при четырехкратном снижении частоты дискретизации.

2. Предложен способ сжатия сигналов в многоканальных радиосистемах с аналого-информационным преобразователем на базе случайного демодулятора, обеспечивающий уменьшение информационного потока от АЦП к вычислителю не менее чем в 4 раза без потери точности восстановления исходных сигналов.

3. Установлены пороговые значения ключевых параметров реальных радиосистем: ОСШ не менее 12 дБ, точка пересечения третьего порядка не ниже 19 дБмВт, разрядность АЦП не менее 8 бит. Комплексное моделирование уточнило предельную разреженность входных сигналов до 1,85%.

4. Разработана методика системного проектирования радиосистем с АИП, включающая требования к аналоговому тракту и рекомендации для многоканальных конфигураций.

5. Создан прототип аналого-информационного преобразователя и проведена его экспериментальная апробация, подтвердившая работоспособность разработанного способа при четырехкратном снижении частоты дискретизации.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Карпов В. Н. Оценка степени разреженности сигналов для применения теории сжатой дискретизации в отношении частотно-разреженных сигналов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2026. Т. 9, № 2. С. 273—286.
2. Применение аналого-информационного преобразователя в FMCW MIMO радиолокаторе / В. Н. Карпов, Ю. М. Мелешин, В. К. Цветков, И. А. Кузьмин // Проектирование и технология электронных средств. – 2024. – № 3. – С. 8-14.

Патенты на изобретение:

3. Патент № 2831607 С1 Российская Федерация, МПК G01S 13/28, H03M 7/30. Способ обработки сигналов в радиолокационных системах с линейной частотной модуляцией: № 2024117369 : заявл. 24.06.2024; опубл. 11.12.2024 / К. С. Лялин, Ю. М. Мелешин, В. Н. Карпов, И. А. Кузьмин – 7 с.

Научные публикации, индексируемые в международной базе данных Scopus:

4. Y. M. Meleshin, V. N. Karpov, M. S. Khasanov, E. V. Ushakova and I. A. Kuzmin. Application Of An Analog-to-Information Converter Algorithm In FMCW MIMO Radar // 2024 IEEE Ural-Siberian

- Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT), 2024, pp. 163-165.
5. Y. M. Meleshin, V. N. Karpov, K. S. Lyalin and I. A. Kuzmin. Application Of An Analog-to-Information Converter In Multichannel Radio Systems // 2023 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT), 2023, pp. 143-146.

Научные доклады в материалах научных конференций:

6. Карпов, В. Н. Применение аналого-информационного конвертера в FMCW MIMO радаре / В. Н. Карпов // Материалы научно-технической конференции "Микроэлектроника и информатика - 2024", 2024. – С. 80-84.
7. Карпов, В. Н. Исследования влияния параметров реальных радиосистем на работу аналого-информационного преобразователя / В. Н. Карпов // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций. Оптические технологии в телекоммуникациях : материалы XXVII и XXIII Международных научно-технических конференций, 2025. – С. 117-118.
8. Карпов, В. Н. Методика оценки степени разреженности сигналов для применения теории сжатой дискретизации в отношении частотно разреженных сигналов / В. Н. Карпов // Радиолокация, навигация, связь : Сборник трудов XXXI Международной научно-технической конференции, 2025. – С. 191-195.
9. Карпов, В. Н. Применение аналого-информационного преобразователя в FMCW MIMO радаре / В. Н. Карпов // VII научный форум телекоммуникации: Теория и технологии ТТТ-2024 : Материалы XXVI Международной научно-технической конференции, 2024. – С. 56-57.
10. Карпов, В. Н. Разработка прототипа аналого-информационного конвертера / В. Н. Карпов // VI Научный форум "Телекоммуникации: теория и технологии" ТТТ-2023 : Материалы XXV Международной научно-технической конференции, 2023. – С. 101-102.
11. Карпов, В. Н. Исследования влияния параметров реальных радиосистем на работу аналого-информационного преобразователя / В. Н. Карпов // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций. Оптические технологии в телекоммуникациях: материалы XXVII и XXIII Международных научно-технических конференций, 2025. – С. 117-118

Подписано в печать
Заказ № ____ Тираж 100 экз. Уч.-изд. л. 1,0 Формат 60х84 1/16.
Отпечатано в типографии ИПК МИЭТ.
124498, г. Москва, Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, МИЭТ.